

21
A-93
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт

В.Л.Ауслендер, М.М.Карлинер, А.А.Наумов,
С.Г.Попов, А.Н.Скринский, И.А.Шехтман

Фазовая неустойчивость интенсивных электронных пучков в накопителях



НОВОСИБИРСК 1965

А н н о т а ц и я

Рассмотрены радиально-фазовые автоколебания, возникающие в накопительных кольцах при больших токах пучка. Получены условия устойчивости в случае произвольной частотной характеристики ускоряющей системы. Учтено также взаимодействие пучка с ускоряющей системой и другими элементами вакуумной камеры на гармониках частоты обращения сгустка. Рассмотрено влияние разброса собственных частот синхротронных колебаний отдельных электронов. Приведены результаты экспериментального исследования самовозбуждения фазовых колебаний в накопителях Института ядерной физики (Новосибирск). Предложены и опробованы некоторые методы подавления фазовой неустойчивости.

Ответственный за выпуск В.Л.Ауслендер

Отпечатано на ротапринтере в Институте
ядерной физики СО АН СССР, тираж 200 экз.

I. Введение

При разработке программы создания накопителей заряженных частиц для экспериментов на встречных пучках Г.И.Будкер и А.А.Наумов высказали в 1959 году предположение, что благодаря взаимодействию пучка с резонатором или другими элементами вакуумной камеры при больших токах возможны явления фазовой неустойчивости.

Этот вопрос теоретически исследован рядом авторов. Согласно условиям устойчивости, полученным Генри /3/, Шахиджановым /8/, а также Барышевым и Хейфецем /4/ достаточно настроить ускоряющий резонатор на частоту несколько ниже частоты генератора, чтобы предотвратить возможность возбуждения фазовых автоколебаний при сколь угодно больших токах пучка.

При экспериментальном исследовании процесса получения больших электронных токов в накопителях установок встречных электрон-электронных пучков /1/ (ВЭП-1) и электрон-позитронных пучков /2/ (ВЭП-2) Института ядерной физики (Новосибирск) было обнаружено, что на этот процесс сильное влияние оказывают частотные характеристики ускоряющей системы накопителя. Изменение настройки резонатора или напряжения на нем приводило к изменению максимального накапливаемого тока во много раз. В ряде случаев изменение настройки резонатора или напряжения вызывало сброс части накопленного тока.

Условия устойчивости, полученные в /3,4,8/, оказались недостаточными в данном случае. Малая расстройка в нужную сторону не устраняла автоколебаний, а при больших токах автоколебания не срывались и значительной расстройкой.

Более строгий анализ устойчивости фазы требует учёта следующих факторов, которые не были учтены в /3,4,8/:

а). Отличие реальной частотной характеристики ускоряющей системы от идеализированной характеристики одиночного колебательного контура.

б) Возможность резонансного возбуждения ускоряющей системы, а также других элементов вакуумной камеры, током пучка на гармониках частоты обращения частиц.

в) Разброс собственных частот радиально-фазовых колебаний отдельных электронов. Этот разброс возникает благодаря некогерентным колебаниям электронов, вызванным квантовыми флуктуациями излучения. Разброс собственных частот вызывает дополнительное затухание когерентных колебаний типа затухания Ландау.

Настоящая работа посвящена получению условий устойчивости с учетом этих факторов.

2. Простейший анализ условий устойчивости.

Как известно /5/, уравнение радиально-фазовых колебаний электронов в накопителе (при отсутствии адиабатического затухания) может быть записано так

$$\ddot{\varphi} + \Omega_0^2 \varphi = -\frac{q\omega_s^2 \alpha}{2\pi E_s} (W - W_s), \quad (I)$$

где $\Omega_0^2 = \frac{U_m |\cos \varphi_s| q\omega_s^2 \alpha}{2\pi E_s}$ - собственная частота радиально-фазовых колебаний, q - кратность радиочастоты, ω_s - угловая частота обращения равновесной частицы, α - коэффициент расширения орбит, E_s - равновесная энергия в эв, W_s и W - радиационные потери энергии соответственно равновесного и неравновесного электронов в эв, U_m - амплитуда напряжения на резонаторе (энергия, сообщаемая равновесному электрону, равна $U_m \sin \varphi_s$).

С другой стороны

$$W - W_s \approx \frac{dW}{dE} (E - E_s) \approx \frac{dW}{dE} \frac{\dot{\varphi}}{q\alpha\omega_s} E_s, \quad (2)$$

Подставляя в (I), можно привести уравнение колебаний к виду

$$\ddot{\varphi} + \frac{\omega_s}{2\pi} \frac{dW}{dE} \dot{\varphi} + \Omega_0^2 \varphi = 0. \quad (3)$$

Это уравнение описывает затухающие колебания при условии $\frac{dW}{dE} > 0$. Радиационные потери складываются из когерентных и некогерентных потерь

$$W = W^{коз} + W^{некоз}$$

Поэтому

$$\frac{dW}{dE} = \frac{dW^{коз}}{dE} + \frac{dW^{некоз}}{dE} \quad (4)$$

Обычно накопитель конструируется так, что $\frac{dW^{некоз}}{dE} > 0$; это обеспечивает затухание радиально-фазовых колебаний при малых токах. Когерентные потери становятся существенными только при больших токах. Если $W^{коз}$ измерять в эв, то

$$W^{коз} = I_q \cdot R, \quad (5)$$

где I_q - q-я гармоника тока пучка, R - активная составляющая сопротивления ускоряющей системы для пучка, рассматриваемого как ток I_q .

При малой амплитуде колебаний

$$\frac{dW^{коз}}{dE} \approx I_q \cdot \frac{dR}{dE} = I_q \cdot q \frac{dR}{d(q\omega)} \cdot \frac{d\omega}{dE}, \quad (6)$$

где ω - мгновенная частота обращения частицы.

Отметим, что (5) справедливо лишь в установившемся режиме или при медленных изменениях энергии частиц. Т.к. колебания происходят с частотой Ω_0 , то это значит, что (5) имеет место, когда $\Omega_0 \ll \frac{1}{\tau_y}$

где $\tau_{уст}$ - время установления процессов в ускоряющей системе, определяемое полосой пропускания.

Условие устойчивости сводится, таким образом к неравенству

$$\frac{dW^{коз}}{dE} + \frac{dW^{некоз}}{dE} = I_q \cdot q \frac{dR}{d(q\omega)} \cdot \frac{d\omega}{dE} + \frac{dW^{некоз}}{dE} > 0$$

или, учитывая, что $\frac{d\omega}{dE} = -\frac{\omega_s \alpha}{E_s}$ и $\frac{dW^{некоз}}{dE} = \frac{4\pi}{\omega_s \tau_c}$ (τ_c - время затухания некогерентных колебаний),

$$I_q \frac{\Omega_0^2 \tau_c}{2U_m |\cos \varphi_s|} \cdot \frac{dR}{d(q\omega)} < 1. \quad (7)$$

Производная $\frac{dR}{d(q\omega)}$ зависит от частотных характеристик ускоряющей системы. Если $\frac{dR}{d(q\omega)} < 0$, то неравенство (7) выполняется при сколь угодно большом токе I_q . В /3,4/ предполагается, что ускоряющая система имеет характеристики идеального колебательного контура. Для этого случая (7) дает условие устойчивости, полученное в /4/ при $\Omega_0 \ll 2\pi \Delta f$, где Δf - полоса пропускания колебательного контура. В частности, если резонансная частота колебательного контура ниже частоты генератора, то

$$\frac{dR}{d(q\omega)} < 0,$$

т.е. система устойчива при любых токах.

3. Условия устойчивости в общем случае.

В более общем случае ускоряющая система может иметь частотные характеристики, отличные от характеристик идеального колебательного контура, причем неравенство $\Omega_0 \ll \frac{1}{\tau_{уст}}$ может не выполняться. Тогда условие устойчивости (7) должно быть заменено другим, более общим.

Такое условие было получено с помощью следующего метода. Рассматривается устойчивость системы, состоящей из ускоряющего устройства и сгустка электронов, который может совершать фазовые колебания. В дальнейшем будем предполагать, что длина сгустка l мнот меньше длины волны ускоряющего напряжения λ :

$$l \ll \lambda$$

При этом условии величина q -й гармоники тока пучка I_q не зависит от амплитуды ускоряющего напряжения.

Фазовые колебания сгусток может совершать благодаря наличию в спектре ускоряющего напряжения частот, отстоящих от частоты генератора на $\pm \Omega_0$. Уравнение вынужденных колебаний фазы имеет вид

$$\ddot{\varphi} + \frac{2}{\tau_c} \dot{\varphi} + \Omega_0^2 \varphi = \frac{\Omega_0^2}{U_m |\cos \varphi_s|} U_{\delta m} \sin \Omega t, \quad (8)$$

где $U_{\delta m}$ - амплитуда напряжения боковой частоты, τ_c - время затухания колебаний за счет радиационного трения, Ω - разность частот генератора и боковой составляющей.

Вынужденные фазовые колебания описываются следующим выражением

$$\varphi = \Phi_m \sin(\Omega t + \psi_\varphi), \quad (9)$$

где

$$\Phi_m = \frac{Q_c}{\sqrt{1 + Q_c^2 x_c^2}} \cdot \frac{U_{\delta m}}{U_m |\cos \varphi_s|}, \quad (10)$$

$$\psi_\varphi = -\frac{\pi}{2} - \arctg Q_c x_c, \quad (11)$$

$$Q_c = \frac{\Omega_0 \tau_c}{2},$$

$$x_c = \frac{\Omega}{\Omega_0} - \frac{\Omega_0}{\Omega} \approx \frac{2(\Omega - \Omega_0)}{\Omega_0}$$

Величина Q_c имеет смысл добротности, а X_c - относительной расстройки колебательной системы, описываемой уравнением (8).

Ток i_q , соответствующий сгустку, совершающему фазовые колебания, является модулированным по фазе током:

$$i_q = -I_q \cos(q\omega_s t - \varphi). \quad (I2)$$

Знак минус перед φ обусловлен тем, что колебания фазы сгустка находятся в противофазе относительно колебаний фазы в.ч. напряжения, описываемых уравнением (8). Знак минус перед I_q определяется записью напряжения на резонаторе в виде

$$u = U_m \sin(q\omega_s t + \varphi_s). \quad (I3)$$

Если в (I2) подставить φ из формулы (9), то получим, предполагая φ малой величиной,

$$i_q \approx -I_q \cos q\omega_s t - \frac{I_q \varphi_m}{2} \left\{ \cos[(q\omega_s - \Omega)t - \psi_\varphi] - \cos[(q\omega_s + \Omega)t + \psi_\varphi] \right\}. \quad (I4)$$

Напряжение, наводимое сгустком на ускоряющей системе, может быть найдено, если известна частотная характеристика ускоряющей системы. Первое слагаемое в правой части (I4) не представляет интереса, т.к. оно лишь изменяет напряжение несущей частоты на резонаторе. Если считать, что U_m есть амплитуда суммарного напряжения, созданного одновременным действием генератора и пучка, то первое слагаемое можно просто опустить.

Напряжение боковых частот на резонаторе будет равно

$$u_{бок} = -\frac{I_q \varphi_m}{2} \left\{ z^- \cos[(q\omega_s - \Omega)t - \psi_\varphi + \psi^-] - z^+ \cos[(q\omega_s + \Omega)t + \psi_\varphi + \psi^+] \right\}, \quad (I5)$$

где $z^- e^{j\psi^-}$, $z^+ e^{j\psi^+}$ - импедансы ускоряющей системы для верхней и нижней боковых частот. Напряжение боковых частот в свою очередь действует на сгусток, вызывая его колебания.

Чтобы получить действующее на сгусток мгновенное напряжение боковых частот, необходимо в (I5) вместо $q\omega_s t$ подставить нуль (или $2\pi n$):

$$U_{бок} = -\frac{I_q \varphi_m}{2} \left\{ z^- \cos(\Omega t + \psi_\varphi - \psi^-) - z^+ \cos(\Omega t + \psi_\varphi + \psi^+) \right\}. \quad (I6)$$

Это выражение можно преобразовать к виду

$$U_{бок} = \frac{I_q \varphi_m}{2} \left\{ [(R^+ - R^-) \cos \psi_\varphi - (X^+ + X^-) \sin \psi_\varphi] \cos \Omega t - [(R^+ - R^-) \sin \psi_\varphi + (X^+ + X^-) \cos \psi_\varphi] \sin \Omega t \right\}, \quad (I7)$$

где $R^+ = z^+ \cos \psi^+$, $R^- = z^- \cos \psi^-$ - активная составляющая импедансов для боковых частот, $X^+ = z^+ \sin \psi^+$, $X^- = z^- \sin \psi^-$ - реактивная составляющая импедансов.

Условия устойчивости описанной замкнутой системы сгусток-резонатор могут быть найдены с помощью критерия Найквиста, который

можно получить условие устойчивости с учётом разброса собственных частот

$$\frac{I_q \cdot Q_c'}{2 U_m |\cos \varphi_s|} (R^+ - R^-) < 1, \quad (25)$$

где $Q_c' = Q_c \frac{A^2 + B^2}{A}$,

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{W(x_3)}{1 + Q_c^2 (x_0 - x_3)^2} dx_3 = A(x_0), \quad B = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q_c (x_0 - x_3)}{1 + Q_c^2 (x_0 - x_3)^2} W(x_3) dx_3 = B(x_0).$$

Величина x_0 определяется из уравнения, аналогичного (20)

$$\frac{B(x_0)}{A(x_0)} = \frac{X^+ + X^-}{R^+ - R^-} \quad (26)$$

Можно показать, что $Q_c' \leq Q_c$. Величина Q_c' зависит от свойств ускоряющей системы, в отличие от Q_c . Разброс частот при определенных условиях мало влияет на условия устойчивости, хотя в других случаях может существенно затруднять возникновение автоколебаний.

Взаимодействие сгустка с ускоряющей системой может происходить не только на q -й гармонике тока сгустка, но и на других гармониках, если ускоряющая система имеет паразитные резонансы на частотах, близких к частотам гармоник. В этом случае условие устойчивости должно учитывать указанное взаимодействие. Расчёт даёт следующее условие устойчивости для одного сгустка на дорожке накопителя:

$$\frac{I_q \cdot Q_c'}{2 U_m |\cos \varphi_s|} \sum_{k=1} \frac{k}{q} C_k \cdot \vartheta_k^2 (R_k^+ - R_k^-) < 1, \quad (27)$$

где I_q - q -я гармоника тока пучка,
 Q_c' - добротность с учетом разброса собственных частот электронов,
 C_k - относительная амплитуда k -й гармоники ($C_q = 1$),
 ϑ_k - коэффициент, учитывающий угол пролета электронов в ускоряющем зазоре резонатора,
 R_k^+ и R_k^- - активные составляющие сопротивления ускоряющей системы на боковых частотах ($\omega_k + \Omega_0$ и $\omega_k - \Omega_0$) k -й гармоники.

Для случая q одинаковых сгустков условие (27) несколько видоизменяется

$$\frac{I_q Q_c'}{2 U_m |\cos \varphi_s|} \sum_{k=1} k C_{kq} \cdot \vartheta_{kq}^2 (R_{kq}^+ - R_{kq}^-) < 1, \quad (28)$$

т.к. выпадают все гармоники, не кратные q .

Полученные условия устойчивости позволили разобраться в тех эффектах, которые наблюдались на установках встречных пучков в ИЯФ (Новосибирск) и которые казались необъяснимыми с точки зрения работ /3/ и /4/.

Рассмотрим некоторые следствия, вытекающие из неравенств (25) и (27). Отличия от предсказаний теории, развитой в /3/ и /4/, наиболее вероятны в том случае, когда собственная частота синхротронных колебаний Ω_0 значительно превышает полосу пропускания ускоряющего резонатора. Для накопительных колец такое соотношение имеет место, благодаря применению в них высокодобротных резонаторов.

На рис.1а,б представлена частотная зависимость активной составляющей сопротивления одиночного колебательного контура и обозначены частоты $q\omega_s \pm \Omega_0$. Рис.1а соответствует системе, устойчивой

при сколь угодно большом токе пучка, т.к. $R^+ - R^- < 0$ при указанной частоте генератора $\omega_r = q\omega_s > \omega_0$. На рис.1б $\omega_r < \omega_0$, поэтому $R^+ - R^- > 0$, и система становится неустойчивой при достаточно большом токе пучка. Эти выводы соответствуют условиям устойчивости, найденным в /3/ и /4/.

Но легко представить себе такие характеристики, при которых условия, полученные в /3/ и /4/, дадут неправильный результат. Для этого обратимся к рис.2а,б. Там изображена частотная характеристика ускоряющей системы, имеющей дополнительный резонанс в окрестности основной резонансной частоты. Такой дополнительный резонанс может возникнуть благодаря наличию длинного фидера между генератором и резонатором или благодаря резонансному контуру генератора, а также по другим причинам. Как видно из рис.2а, несмотря на то, что $q\omega_s > \omega_0$, все же $R^+ - R^- > 0$, и при достаточно большом токе система может стать неустойчивой.

В противоположность этому на рис.2б изображена частотная характеристика, при которой система устойчива при сколь угодно большом токе, если $q\omega_s < \omega_0$. Как видим, если не учитывать дополнительного резонанса, который может быть расположен довольно далеко от основного резонанса, то вывод относительно устойчивости системы будет неправильным.

На рис.3 представлен пример частотной характеристики с дополнительным резонансом на одной из гармоник частоты обращения. Из этого рисунка видно, что хотя $q\omega_s > \omega_0$, сумма $(R^+ - R^-) + k(R_k^+ - R_k^-) > 0$, и система становится неустойчивой, начиная с некоторого тока пучка. Резонанс на гармониках может быть опасен, т.к. в накопителях длина сгустка невелика, и гармоники тока высоких порядков имеют почти

ту же амплитуду, что и q -я гармоника, а разность $R_k^+ - R_k^-$ ловии устойчивости умножается на номер гармоники.

4. Численные примеры.

Приведем некоторые численные примеры, позволяющие представить порядок величин, о которых выше шла речь. На установке встречных электрон-позитронных пучков ВЭПП-2 ускоряющий резонатор и накопитель имеют следующие параметры:

резонансная частота	$f_0 = 25,1$ МГц,
шунтовое сопротивление с учетом шунтирующего действия генератора	$R_0 = 25$ ком,
нагруженная добротность	$Q_n = 2500$,
напряжение на резонаторе	$U_m = 10$ кВ,
кратность	$q = 1$,
частота фазовых колебаний	$F_0 = 160$ кгц,
энергия электронов при накоплении	$E_s = 100$ МэВ,
время затухания синхротронных колебаний	$\tau_c = 1$ сек,
число электронов, соответствующих току 1 ма	$N_s = 2,5 \cdot 10^8$.

На частоте $f_0 \pm F_0$ активное сопротивление резонатора

$$R^\pm = \frac{R_0}{1 + Q_n^2 \left(\frac{2F_0}{f_0}\right)^2} = 25 \text{ ом.}$$

Предположим, что за счет дополнительного резонанса появилось увеличение сопротивления R^+ , так что $R^+ - R^- = 25$ ом. Тогда система будет устойчива при токе

$$I_m < \frac{4}{\Omega_0 \tau_c} \frac{U_m}{R^+ - R^-} = 1,6 \text{ ма.}$$

Т.к. амплитуда первой гармоники в 2 раза больше среднего тока, то средний ток должен быть меньше 0,8 ма.

В качестве другого примера рассмотрим проект накопительного электрон-позитронного кольца при Кэمبرиджском электронном синхротроне /6/. Основные данные ускоряющей системы и накопительного кольца, определенные на основании /6/ и /7/, суть следующие:

резонансная частота	$f_0 = 476$ Мгц,
шунтовое сопротивление с учетом шунтирующего действия генератора	$R_0^*) = 20$ Мом,
нагруженная добротность	$Q_n^*) = 10000$,
напряжение на резонаторе	$U_m = 2,4$ Мв,
кратность	$ \cos \varphi_s = 0,98$,
частота фазовых колебаний	$q = 276$,
энергия электронов при накоплении	$F_0^*) = 360$ кгц,
время затухания синхротронных колебаний	$E_s = 2 \cdot 10^9$ эв,
	$\tau_c = 0,012$ сек.

На частоте $f_0 \pm F_0$ активное сопротивление резонатора равно

$$R^\pm = \frac{R_0}{1 + Q_n^2 \left(\frac{2F_0}{f_0} \right)^2} = 90 \text{ ком.}$$

Предположим, что благодаря паразитному резонансу частотная характеристика имеет на частоте $f_0 + F_0$ подъем всего на 1%, т.е.

$R^+ - R^- = 1$ ком. Тогда система будет устойчива при токе

$$I_m < \frac{4}{\Omega_0 \tau_c} \cdot \frac{U_m}{R^+ - R^-} = 3,6 \text{ ма,}$$

^{*)} Звездочкой помечены данные, рассчитанные ориентировочно на основании информации, содержащейся в /6/ и /7/.

что соответствует среднему току 1,8 ма и $\sim 7 \cdot 10^9$ электронов в накопителе.

В этих вычислениях не учитывалось дополнительное затухание за счет разброса собственных частот фазовых колебаний отдельных электронов. Учет этого затухания увеличивает предельный ток ориентировочно в $5 \div 20$ раз в зависимости от настройки резонатора.

5. Экспериментальные данные.

Явления фазовой неустойчивости наблюдались в Институте ядерной физики как на установке ВЭП-1, так и на установке ВЭПП-2. Более детально они исследованы на установке ВЭПП-2; поэтому ниже приводятся главным образом, экспериментальные данные, полученные на последней установке.

Блок-схема высокочастотной части ВЭПП-2 изображена на рис.4. Задающий генератор генерирует напряжение частоты 25,1 Мгц, которое подается затем на усилитель мощности. Усилитель обеспечивает максимальную мощность на выходе порядка 20 квт. Усиленное высокочастотное напряжение по 60-омному коаксиальному воздушному фидеру длиной 48 м подается на резонатор. Схематический чертеж резонатора представлен на рис.5. Основные электрические данные резонатора приведены выше. Шунтовое сопротивление резонатора (собственное) около 50 ком.

Ток пучка измерялся с помощью пикап-электрода, расположенного в одном из прямолинейных промежутков накопительного кольца. Сигнал частотой 25,1 Мгц снятый с пикапа, усиливается, затем детектируется. Продетектированный сигнал подается на самописец, измеряющий ток пучка. Следует отметить, что измерение тока пучка по первой гармонике дает правильный результат лишь при малой длине сгустка. При

сильной раскачке фазовых колебаний наблюдалось уменьшение первой гармоники; после затухания колебаний первая гармоника восстанавливает свою первоначальную величину, если при раскачке не была потеряна часть электронов.

Фазовые колебания регистрировались с помощью частотного детектора. Напряжение частоты 25,1 Мгц подавалось на частотный детектор через усилитель-ограничитель, выдающий на выходе напряжение постоянной амплитуды при токе пучка, большем 2-3 ма. При раскачке когерентных фазовых колебаний на выходе частотного детектора появляется напряжение, частота которого равна частоте фазовых колебаний Ω_0 , а амплитуда пропорциональна девиации частоты, т.е. величине $\Omega_0 \Phi_m$, где Φ_m - амплитуда когерентных фазовых колебаний. Это напряжение наблюдалось на осциллографе. Кроме того, основные величины можно было фотографировать с помощью многоканального шлейфового осциллографа.

Во время испытаний накопителя было обнаружено, что если поддерживать частоту генератора постоянной - около 25,1 Мгц - и накапливать электронный ток при различной фиксированной настройке резонатора, то предельный накопленный ток сильно зависит от настройки резонатора.

На рис.6 изображен график, показывающий зависимость накопленного тока от резонансной частоты резонатора (кривая 1). На том же графике нанесена кривая 2, показывающая зависимость напряжения на резонаторе от резонансной частоты при постоянной мощности возбуждения. Кривая 3 показывает зависимость максимального накопленного тока от резонансной частоты при условии, что напряжение на резонаторе при перестройке поддерживается равным 2 кв за счет изменения мощности возбуждения генератора.

Кривые 1 и 3 достаточно четко показывают, что накопленный ток меняется в широких пределах в зависимости от настройки резонатора. Существенно, что этот ток меняется на благоприятном склоне резонансной кривой. Частотный детектор показывает, что при достижении максимального тока имеют место когерентные фазовые колебания большой амплитуды. Колебания отсутствуют только при очень сильной расстройке резонатора, так что его резонансная частота становится значительно ниже частоты генератора. Это противоречит условиям устойчивости, найденным в /3/ и /4/, т.к. согласно этим условиям достаточно, чтобы резонансная частота резонатора была немного ниже частоты генератора, и тогда система устойчива при сколь угодно больших токах пучка.

Если предельный ток накоплен при сильной расстройке резонатора в благоприятную сторону, то в процессе перестройки в сторону резонанса фазовые колебания резко возрастают и часть накопленного тока теряется. Этот эффект иллюстрируется осциллограммами, приведенными ниже.

Чтобы устранить описанные нежелательные явления, было предпринято подробное исследование частотных характеристик ускоряющей системы в окрестности 25,1 Мгц. Эти исследования показали, что частотная характеристика имеет дополнительный резонанс, обусловленный контуром генератора. Вид частотной характеристики соответствовал кривой а) на рис.2. Высота пика была сравнительно невелика, порядка 2-3% от высоты основного резонансного пика. Перестройкой контура генератора и некоторыми переделками удалось дополнительный пик передвинуть на другую сторону резонансной кривой резонатора (рис.2б). Такое изменение не привело к сколько-нибудь заметному изменению наблюдаемых эффектов.

В дальнейшем для подавления фазовых колебаний в один из прямолинейных промежутков накопителя была введена дрейфовая трубка, соединенная с пассивным резонансным контуром, который можно было перестраивать в окрестности 25,1 Мгц. Вносимое дрейфовой трубкой сопротивление при настройке в резонанс составляло около 20 ом. Испытания показали, что если система находилась вблизи порога возбуждения фазовых колебаний, то перестройка контура дрейфовой трубки на частоту $\omega_r + \Omega_0$ вызывала возбуждение колебаний, а при перестройке на частоту $\omega_r - \Omega_0$ - колебания срывались. Эти результаты согласуются с полученными в данной работе условиями устойчивости. Дрейфовая трубка была использована также для введения обратной связи, подавляющей колебания. Обратная связь благодаря включенному в ее цепь усилителю действовала сильнее, чем пассивный контур, но ее действие было недостаточным для подавления колебаний. Отметим, что цепь обратной связи введенная в ускоряющую систему накопителя ВЭП-1, успешно подавляла фазовые колебания. Воздействие на пучок осуществлялось в этом случае путем амплитудной модуляции ускоряющего напряжения.

В связи с очень сильной неустойчивостью системы, которую не удавалось подавить, было высказано предположение о том, что на пути пучка имеется паразитный контур, возбуждающийся на высшей гармонике частоты обращения. При исследовании резонатора такой контур действительно был найден. Оказалось, что отрезок радиальной линии, образованной дисками резонатора (см. рис. 5) резонирует на волне типа H_{01} . Распределение электрического поля в этом резонаторе показано на рис. 7. Как видно из этого рисунка, на оси имеет место максимум напряжения, благодаря чему резонатор сильно взаимодействует с пучком. Параметры паразитного резонатора оказались следующими: $f_0 \approx 452$ Мгц, т.е. близко к частоте 18 гармоника, $Q = 3000$, шунтовое сопро-

тивление (расчетное) $R_0 = 30$ ком. Учитывая, что в условии устойчивости (28) сопротивление множится на номер гармоники, действие этого резонанса должно быть очень сильным. Относительное содержание 18 гармоника в токе пучка $C_{18} = 0,7$. Резонансная частота паразитного резонанса очень мало изменяется при перестройке основного ускоряющего резонатора.

Напряжение 18-й гармоники между дисками удалось непосредственно обнаружить с помощью приемника, на который подавался сигнал с контрольной петли, введенной в полость резонатора.

На основании изложенного в разделе 3 анализа для того, чтобы сделать систему устойчивой, достаточно увеличить частоту генератора на 20-30 кгц, чтобы частота 18-й гармоники стала больше 452 Мгц. Однако, из-за недостатков магнитной системы накопителя это сделать было невозможно, т.к. нелинейный бетатронный резонанс на новом радиусе приводил к быстрой потере пучка. После корректировки магнитного поля появилась возможность повысить частоту генератора. В результате действительно удалось сделать пучок устойчивым. Устойчивость сохранялась даже при переходе на неблагоприятный склон частотной характеристики основного резонатора.

Изложенные данные хорошо иллюстрируются осциллограммами, полученными с помощью четырехканального шлейфового осциллографа. Эти осциллограммы приведены на рис. 8а, б, в, г. На каждой из осциллограмм представлено изменение амплитуды напряжения 18-гармоники, наводимой пучком в резонаторе (кривая 1), напряжения основной гармоники на резонаторе (кривая 2), амплитуды фазовых колебаний (кривая 3), первой гармоники тока пучка (кривая 4).

Для снятия осциллограмм резонатор расстраивался в благоприятную сторону так, чтобы напряжение на нем было $1,5 \div 2$ кв (при резонансно-

В дальнейшем для подавления фазовых колебаний в один из прямолинейных промежутков накопителя была введена дрейфовая трубка, соединенная с пассивным резонансным контуром, который можно было перестраивать в окрестности 25,1 Мгц. Вносимое дрейфовой трубкой сопротивление при настройке в резонанс составляло около 20 ом. Испытания показали, что если система находилась вблизи порога возбуждения фазовых колебаний, то перестройка контура дрейфовой трубки на частоту $\omega_r + \Omega_0$ вызывала возбуждение колебаний, а при перестройке на частоту $\omega_r - \Omega_0$ - колебания срывались. Эти результаты согласуются с полученными в данной работе условиями устойчивости. Дрейфовая трубка была использована также для введения обратной связи, подавляющей колебания. Обратная связь благодаря включенному в ее цепь усилителю действовала сильнее, чем пассивный контур, но ее действие было недостаточным для подавления колебаний. Отметим, что цепь обратной связи введенная в ускоряющую систему накопителя ВЭП-1, успешно подавляла фазовые колебания. Воздействие на пучок осуществлялось в этом случае путем амплитудной модуляции ускоряющего напряжения.

В связи с очень сильной неустойчивостью системы, которую не удавалось подавить, было высказано предположение о том, что на пути пучка имеется паразитный контур, возбуждающийся на высшей гармонике частоты обращения. При исследовании резонатора такой контур действительно был найден. Оказалось, что отрезок радиальной линии, образованной дисками резонатора (см.рис.5) резонирует на волне типа H_{01} . Распределение электрического поля в этом резонаторе показано на рис.7. Как видно из этого рисунка, на оси имеет место максимум напряжения, благодаря чему резонатор сильно взаимодействует с пучком. Параметры паразитного резонатора оказались следующими: $f_0 \approx 452$ Мгц, т.е. близко к частоте 18 гармонике, $Q = 3000$, шунтовое сопро-

тивление (расчетное) $R_0 = 30$ ком. Учитывая, что в условии устойчивости (28) сопротивление множится на номер гармоники, действие этого резонанса должно быть очень сильным. Относительное содержание 18 гармонике в токе пучка $C_{18} = 0,7$. Резонансная частота паразитного резонанса очень мало изменяется при перестройке основного ускоряющего резонатора.

Напряжение 18-й гармоники между дисками удалось непосредственно обнаружить с помощью приемника, на который подавался сигнал с контрольной петли, введенной в полость резонатора.

На основании изложенного в разделе 3 анализа для того, чтобы сделать систему устойчивой, достаточно увеличить частоту генератора на 20-30 кгц, чтобы частота 18-й гармоники стала больше 452 Мгц. Однако, из-за недостатков магнитной системы накопителя это сделать было невозможно, т.к. нелинейный бетатронный резонанс на новом радиусе приводил к быстрой потере пучка. После корректировки магнитного поля появилась возможность повысить частоту генератора. В результате действительно удалось сделать пучок устойчивым. Устойчивость сохранялась даже при переходе на неблагоприятный склон частотной характеристики основного резонатора.

Изложенные данные хорошо иллюстрируются осциллограммами, полученными с помощью четырехканального шлейфового осциллографа. Эти осциллограммы приведены на рис.8а,б,в,г. На каждой из осциллограмм представлено изменение амплитуды напряжения 18-гармоники, наводимой пучком в резонаторе (кривая 1), напряжения основной гармоники на резонаторе (кривая 2), амплитуды фазовых колебаний (кривая 3), первой гармоники тока пучка (кривая 4).

Для снятия осциллограмм резонатор расстраивался в благоприятную сторону так, чтобы напряжение на нем было $1,5 \div 2$ кв (при резонансно

напряжении 10 кв). При такой расстройке накапливался пучок, со средним током около 60 ма. Затем резонатор плавно перестраивался в сторону более высоких частот. Осциллографирование производилось в процессе перестройки. Временной масштаб осциллограмм на рис. 8 - 50 мм в сек. Осциллограммы сделаны для четырех частот генератора: 25,112 Мгц, 25,120 Мгц, 25,128 Мгц и 25,140 Мгц.

На первой осциллограмме (рис. 8а) видно, что при перестройке резонатора на благоприятном с точки зрения работ /3/ и /4/ склоне резонансной кривой возникают фазовые колебания, которые приводят к потере части пучка. Одновременно с появлением фазовых колебаний появляется также 18-я гармоника напряжения, которая в данном случае представляет собой верхнюю боковую составляющую фазо-модулированного напряжения 18-й гармоники.

При частоте генератора 25,120 Мгц (рис. 8б) фазовые колебания также возникают на благоприятном склоне резонансной кривой, но они слабее и не приводят к потере тока пучка. Следует отметить, что при начальном токе пучка больше 60 ма сброс части пучка происходит и на этой частоте генератора.

Третья осциллограмма (рис. 8в) показывает, что на частоте 25,128 Мгц фазовые колебания нестабильны. 18-я гармоника напряжения присутствует независимо от наличия фазовых колебаний. Повидимому, на этой частоте 18-я гармоника частоты генератора очень близка к резонансной частоте паразитного резонатора.

При частоте генератора 25,140 Мгц (рис. 8г) мы переходим на другой склон резонансной кривой паразитного резонатора, благодаря чему фазовые колебания подавляются на обоих склонах резонансной кривой основного резонатора. Напряжение 18-й гармоники растет вместе с напряжением основной частоты, что связано, повидимому, с уменьше-

нием длины ступка. На этой осциллограмме в самом конце виден резкий вынос фазовых колебаний, сопровождающийся некоторой потерей тока. Этот вынос обусловлен, вероятно, тем, что максимум резонансной кривой основного резонатора приближается к верхней боковой частоте.

Полоса пропускания приёмника для измерения напряжения 18-й гармоники - около 4 Мгц.

Осциллограммы напряжения 18-й гармоники (кривые I на рис. 8) количественно могут быть объяснены, по-видимому, с учетом изменения длины ступка после возникновения фазовых колебаний.

• 6. Заключение

Эксперименты с накопителями ВЭП-1 и ВЭП-2 Института ядерной физики (Новосибирск) показали, что самовозбуждение когерентных радиально-фазовых колебаний ограничивает максимальную величину накопленного тока. Как выяснено в результате анализа, для определения условий устойчивости недостаточно рассматривать ускоряющий резонатор накопителя как одиночный контур. Необходимо учитывать реальную частотную характеристику как вблизи частоты ускоряющего напряжения, так и вблизи гармоник частоты обращения.

Результаты анализа указывают на возможность разработки эффективных мер подавления колебаний путем создания частотной характеристики требуемой формы, введением цепей обратной связи и др. Создание необходимой формы частотной характеристики должно предусматриваться при проектировании накопителей.

Авторы выражают искреннюю благодарность Г.И.Будкеру за постоянный интерес к работе, а также Б.А.Лазаренко, А.А.Литвинову, И.К.Седярову, Т.П.Стародубцевой, Е.А.Пирушкину и Г.М.Тумайкину за помощь в экспериментах.

нием длины сгустка. На этой осциллограмме в самом конце виден резкий выброс фазовых колебаний, сопровождающийся некоторой потерей тока. Этот выброс обусловлен, вероятно, тем, что максимум резонансной кривой основного резонатора приближается к верхней боковой частоте.

6. Заключение

Эксперименты с накопителями ВЭП-1 и ВЭП-2 Института ядерной физики (Новосибирск) показали, что самовозбуждение когерентных радиально-фазовых колебаний ограничивает максимальную величину накопленного тока. Как выяснено в результате анализа, для определения условий устойчивости недостаточно рассматривать ускоряющий резонатор накопителя как одиночный контур. Необходимо учитывать реальную частотную характеристику как вблизи частоты ускоряющего напряжения, так и вблизи гармоник частоты обращения.

Результаты анализа указывают на возможность разработки эффективных мер подавления колебаний путем создания частотной характеристики требуемой формы, введением цепей обратной связи и др. Создание необходимой формы частотной характеристики должно предусматриваться при проектировании накопителей.

Авторы выражают искреннюю благодарность Г.И.Будкеру и А.А.Наумову за постановку задачи и постоянный интерес к работе, а также Б.А.Лазаренко, А.А.Литвинову, И.К.Седярову, Т.П.Стародубцевой, Е.А.Пирушкину и Г.М.Тумайкину за помощь в экспериментах.

- 22 -

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. Работы по встречным электрон-электронным, позитрон-электронным и протон-протонным пучкам Института ядерной физики СО АН СССР. Доклад на Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963.
2. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. Работы по сильноточным электронным ускорителям Института ядерной физики СО АН СССР. Доклад на Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963.
3. I. Henry. - J. Appl. Phys., 31, 1338, 1960.
4. А.И.Барышев, С.А.Хейфец. ЖТФ, 33, 320, 1963.
5. Р.Вильсон. Синхротрон. В сб. "Ускорители", Гос.изд. литературы по атомной энергии, М., 1962, стр.221.
6. P.F.Cooper, G.E.Fisher and oth. - "Proposal for a Storage Ring at the Cambridge Electron Accelerator. Apr., 1964.
7. K.W.Robinson. - "Stability of Beam in Radiofrequency System", CEAL-1010, Cambridge, Feb., 1964.
8. С.С.Шахиджанов. Атомная энергия, 12, 483, 1962

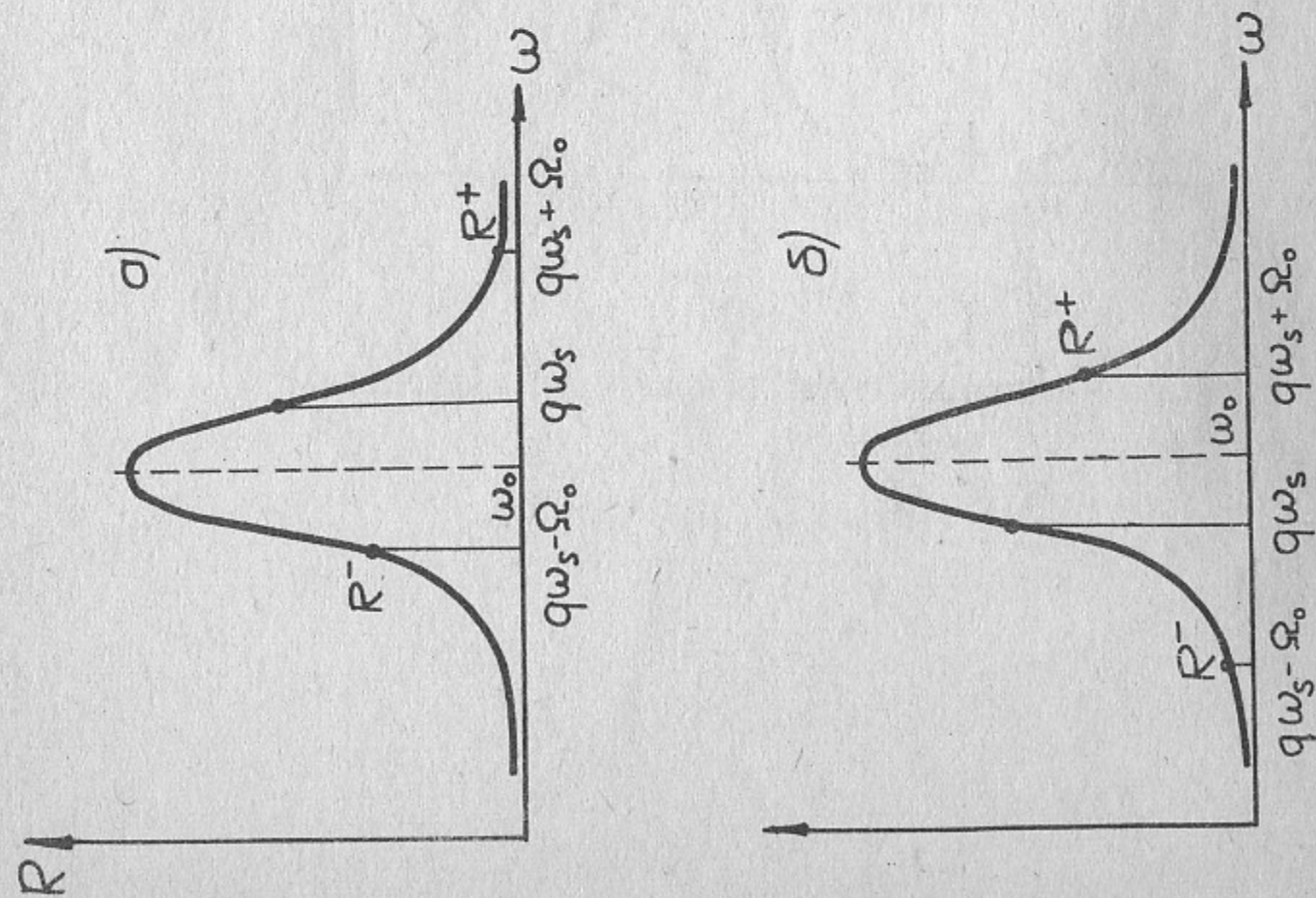


Рис.1. Частотная характеристика резонатора

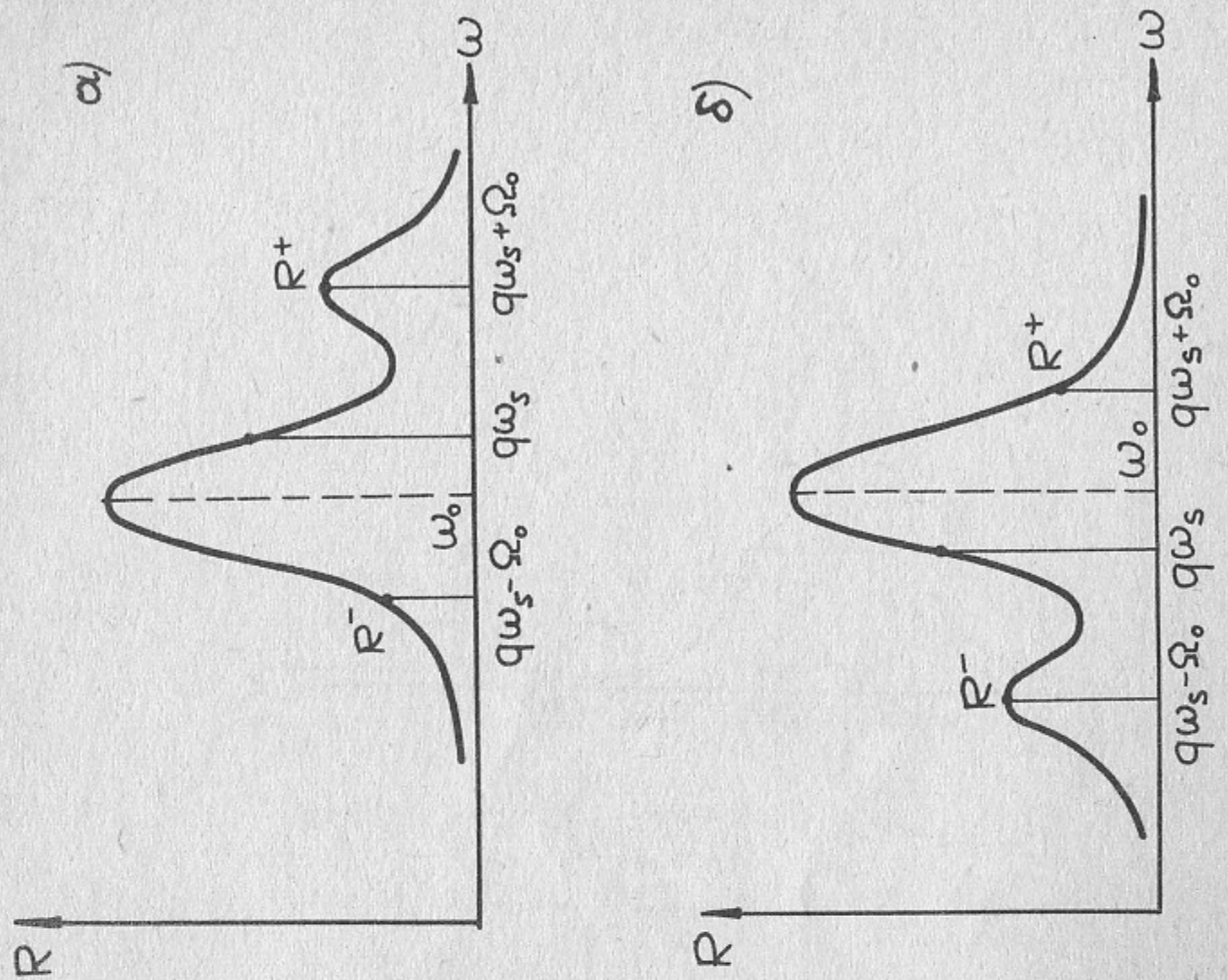


Рис.2. Частотная характеристика резонатора с дополнительным резонансом

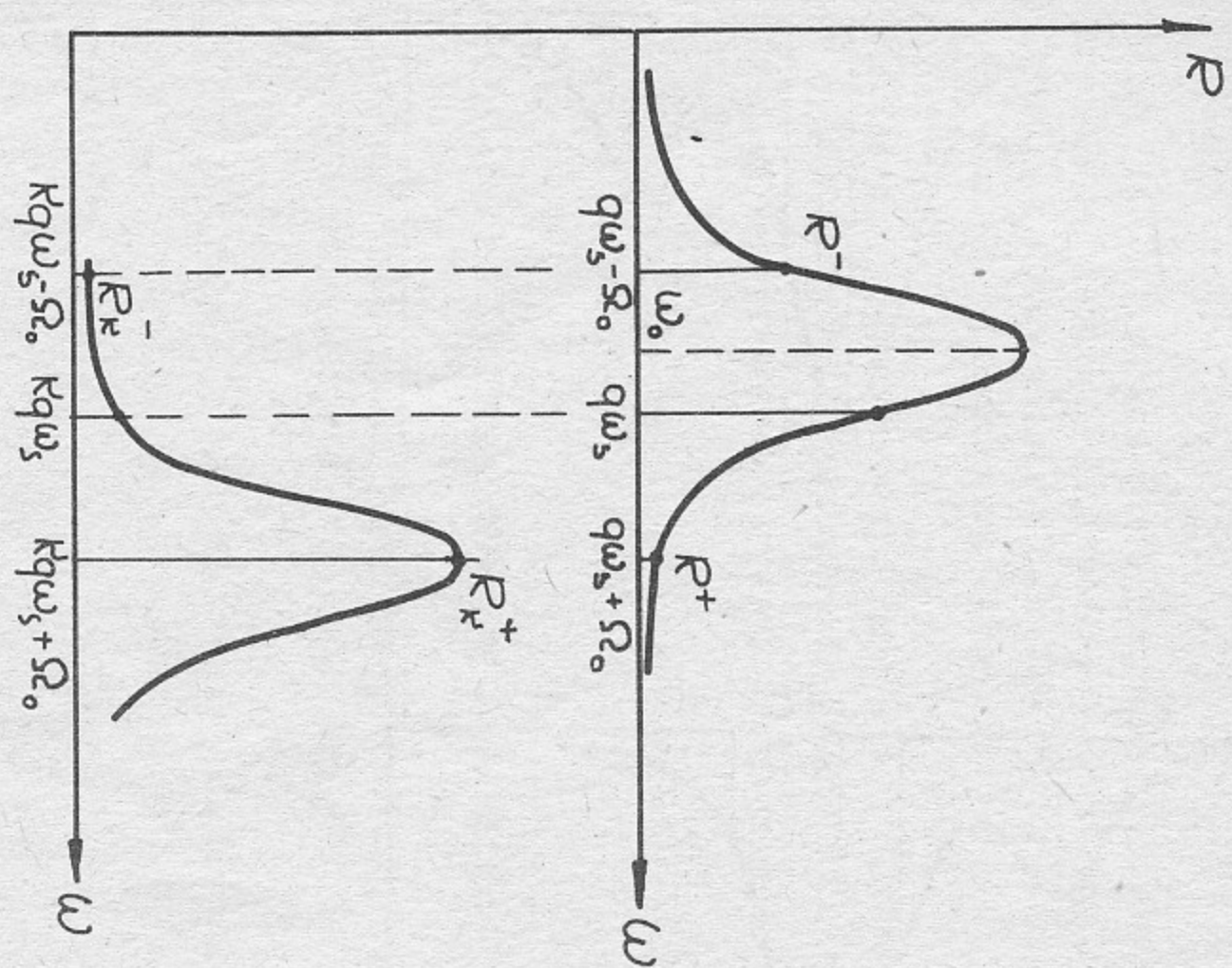


Рис. 3. Дополнительный резонанс на гармонике

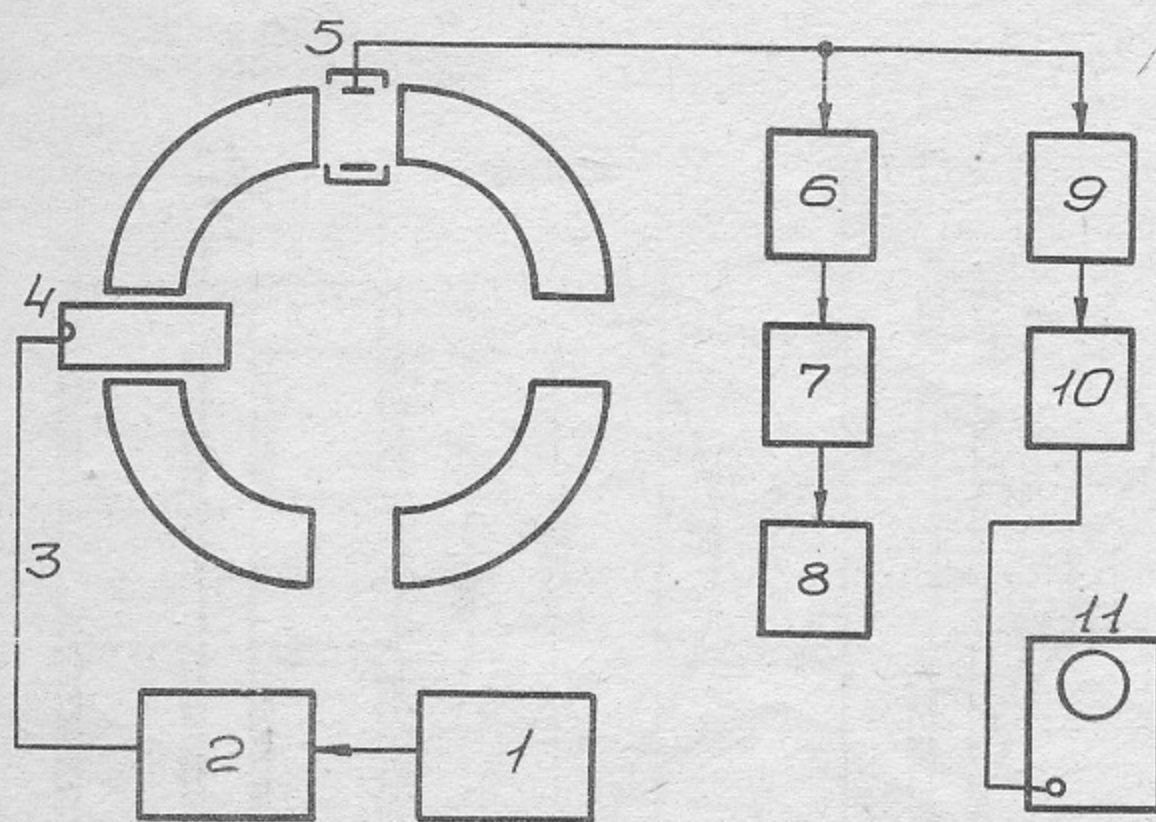


Рис. 4. Блок-схема ускоряющей системы ВЭШ-2.

- 1 - задающий генератор; 2 - усилитель мощности;
- 3 - фидер; 4 - резонатор; 5 - пикап-электрод;
- 6 - усилитель 25 Мгц; 7 - детектор; 8 - самописец;
- 9 - усилитель - ограничитель 25 Мгц;
- 10 - частотный детектор; 11 - осциллограф

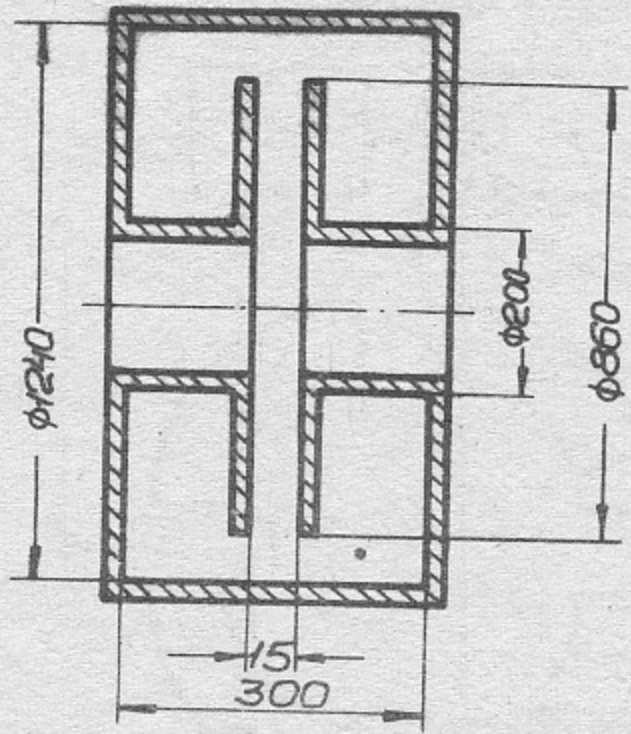


Рис. 5. Схематический чертёж резонатора

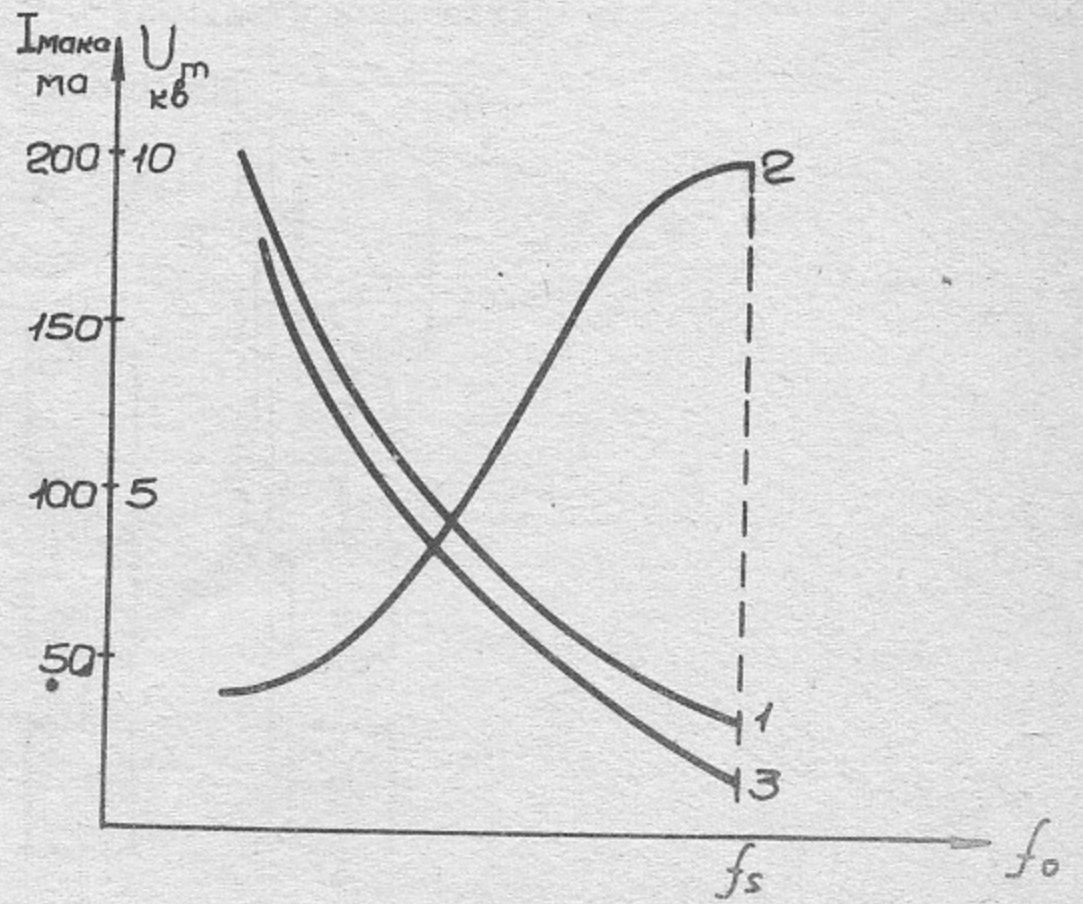
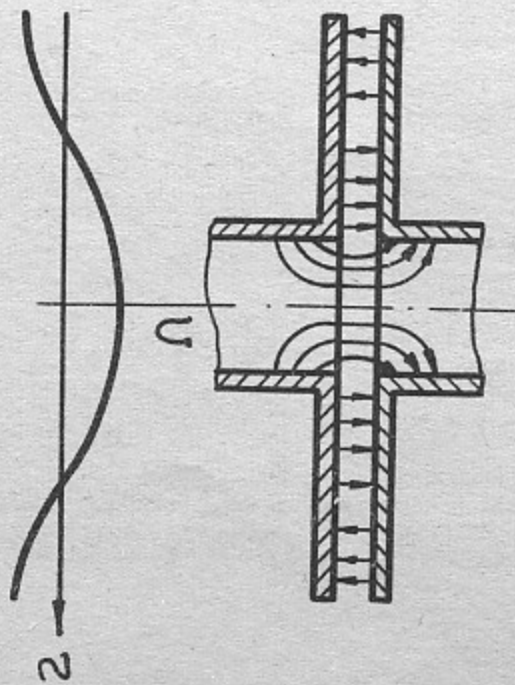
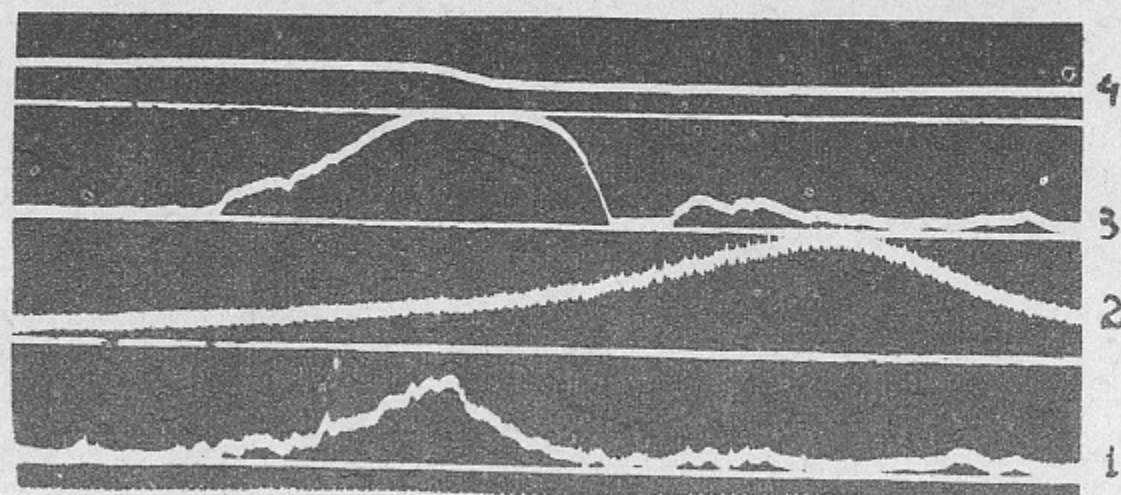


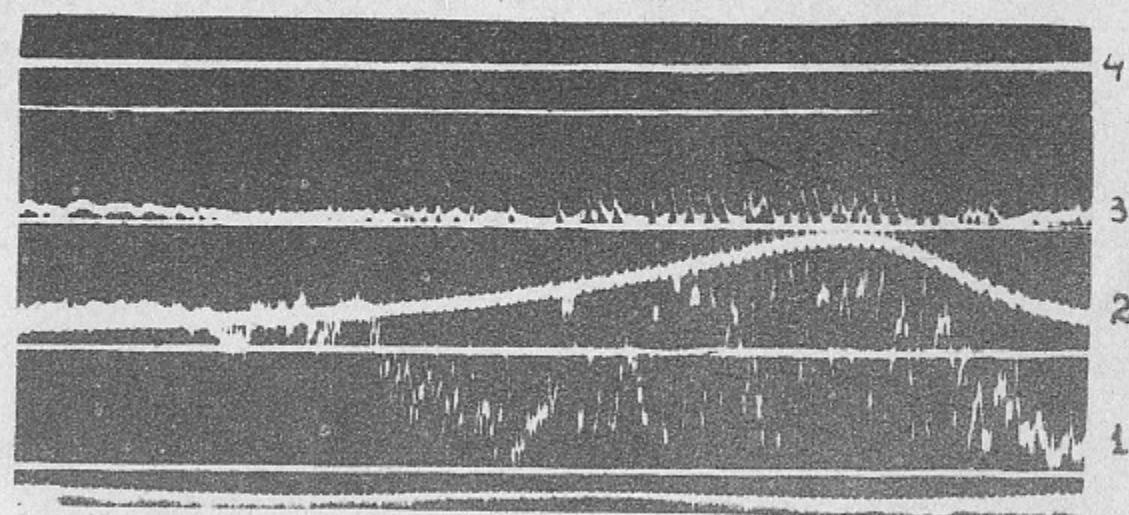
Рис. 6. Зависимость накопленного тока от настройки резонатора



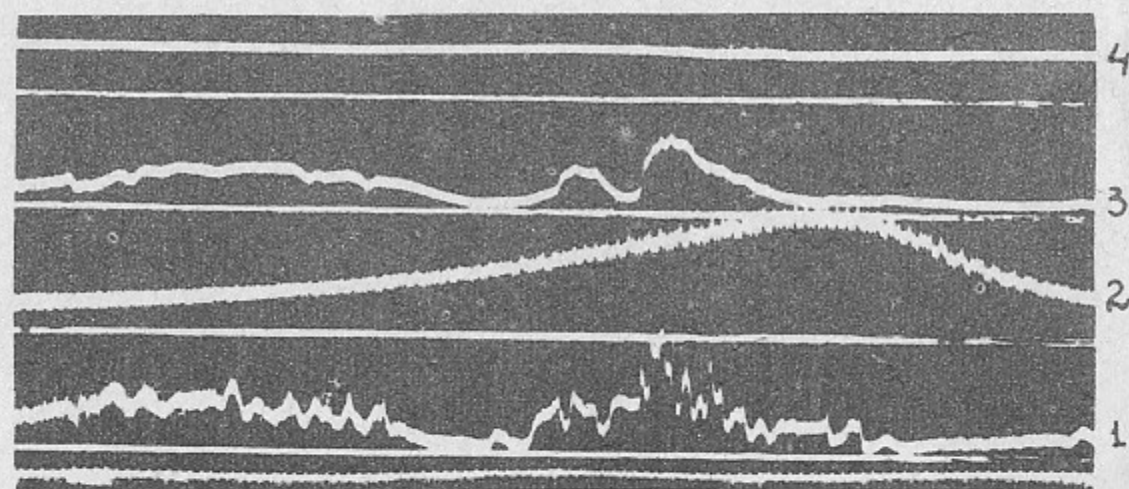
Р и с . 7 .
Паразитный резонатор



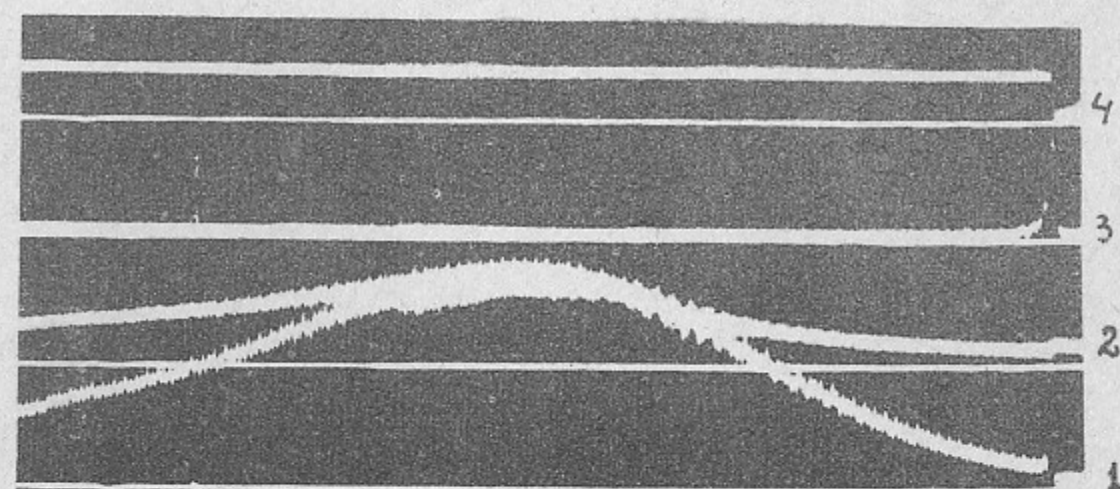
а) $f_s = 25,112$ МГц



в) $f_s = 25,128$ МГц



б) $f_s = 25,120$ МГц



г) $f_s = 25,140$ МГц

Рис.8. 1 - напряжение 18-й гармоники, 2 - напряжение основной гармоники на резонаторе, 3 - амплитуда фазовых колебаний, 4 - первая гармоника тока пучка.